

10. Пятов Е. А. Стране был нужен уран. История геологоразведочных работ на уран в СССР. Под. ред. Г. А. Машковцева. – М.: ВИМС, 2005. – 246 с.
11. Собакин П. И. Радиоэкологические исследования техногенно-нарушенных участков ландшафта в зоне уранового месторождения Республики Саха (Якутия) / Молчанова И. В. // Дефектоскопия, 1994. – № 9. – С. 74–78.
12. Собакин П. И. Миграция тяжелых естественных радионуклидов в почвенно-растительном покрове в условиях техногенного загрязнения / Молчанова И. В. // Экология, 1998. – № 2. – С. 98–101.
13. Собакин П. И. Накопление тяжёлых естественных радионуклидов мхами Южной Якутии // Сибирский экологический журнал, 2002. – № 1. – С. 29–34.
14. Соломатин Г. Б. История создания минерально-сырьевой базы урана и пути решения вопросов ураноносности Дальнего Востока и Якутии / Бражников А. С. // Разведка и охрана недр, 2005. – № 10. – С. 36–45.
15. Собакин П. И. Радиоэкологическая обстановка в местах геолого-разведочных работ и добычи радиоактивного сырья в Якутии / Герасимов Я. Р., Перк А. А. // Атомная энергия, 2014. – Т. 117. – Вып. 4. – С. 235–238.
16. Собакин П. И. Миграция радионуклидов в поверхностных водах горно-таежных ландшафтов Эльконского урановорудного района / Чевычелов А. П., Герасимов Я. Р. // Геохимия, 2015. – № 11. – С. 1032–1042.
17. Собакин П. И. Естественные и искусственные радионуклиды в мерзлотных почвах Якутии: автореф. дис.... докт. биол. наук. – Улан-Удэ, 2015. – 39 с.
18. Собакин П. И. Радиоэкологическая обстановка в районе монацитовый россыпи в Южной Якутии / Герасимов Я. Р., Перк А. А. // Геохимия, 2019. – Т. 64. – № 4. – С. 440–448.

АНАЛИЗ ФОНОВОЙ И АНОМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАДИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

И. С. Соболев¹, К. А. Орехов¹, А. Н. Орехов²

¹ООО «Гео Сервис»

Томск, Россия, geolsob@yandex.ru, orekhovan@mail.tomsknet.ru

²Томский политехнический университет

Томск, Россия, orekhovan@mail.tomsknet.ru

BACKGROUND AND ANOMALY COMPONENTS ANALYSIS OF THE RADIOACTIVE SPATIAL PATTERNS IN GAMMA- SPECTROMETRIC EXPLORATION FOR MINERAL RESOURCES

I. S. Sobolev¹, K. A. Orekhov¹, A. N. Orekhov²

¹LLC «Geo Service»

Tomsk, Russia, geolsob@yandex.ru, orekhovan@mail.tomsknet.ru

²Tomsk Polytechnic University

Tomsk, Russia, orekhovan@mail.tomsknet.ru

The paper discusses an algorithm for gamma-spectrometric data statistical processing to improve the reliability of altered rocks detecting. The radioactive backgrounds spatial variability is studied by k-means cluster analysis. Data integration and mapping of hydrothermal altered rocks is carried out by Principal Components Analysis (PCA).

Введение

Гамма-спектрометрическая съемка в геологоразведочном производстве привлекается для решения задач геологического картирования крупных территорий в аэроварианте реализации и выявления областей развития площадных и локальных наложенных изменений горных пород. Последние сопровождаются

процессы предрудной гидротермальной подготовки крупных геологических блоков и собственно рудной минерализации, а также эпигенетические преобразования осадочных толщ над залежами углеводородов.

Геохимия ⁴⁰K, ²³⁸U и ²³²Th, являющихся естественными радиоактивными элементами (ЕРЭ), хорошо изучена. Разнообразные аспекты поведения ЕРЭ

в эндогенных и экзогенных процессах освещены в большом количестве литературных источников. Главными при интерпретации гамма-спектрометрических съемок являются следующие моменты.

Дифференциация магматических и вулканических образований в распределении ЕРЭ выражается в синхронном увеличении концентраций радионуклидов от пород основного состава к кислым и с повышенной щелочностью. Изменчивость радиоактивности метаморфических пород хорошо увязывается с различием их первичного состава. С высокой прямой корреляцией происходит рост содержания ЕРЭ в ряду соленосные – карбонатные – кремнистые – терригенные образования. В гранулометрическом спектре терригенных осадков их уровни накопления упорядоченно увеличиваются от псаммитовых к алевроитовым разностям. Во всех трех главных группах пород есть высокорadioактивные представители, нарушающие общий тренд прямой корреляции изменчивости концентраций ЕРЭ [2, 5, 7, 8, 9, 14 и др.].

Иное распределение радионуклидов происходит при метасоматических изменениях горных пород. Их миграция определяется физико-химическими параметрами гидротермальных систем и химическим составом флюида. Наложенная трансформация минерального состава пород сопровождается появлением антагонизма в поведении ЕРЭ. Это определяет возможность использования радиометрических методов при поисках руд в т.ч. нерадиоактивных металлов, а также залежей углеводородов [1, 4, 10, 12, 15, 16, 18, 22, 23 и др.]. При гамма-спектрометрическом картировании измененных пород помимо информации о распределении ЕРЭ используют их отношения – K/Th , U/Th (Th/U), U/K . Наиболее сильная корреляция в различных типах горных пород и продуктах наложенных изменений характерна для K и Th [4, 19]. Изменение миграционных свойств урана в зависимости от валентного состояния (U^{4+} и U^{6+}) определяет большую вариативность его содержаний по сравнению с K и Th в координатах физико-химических условий эндогенных и экзогенных процессов. При химическом выветривании горных пород ЕРЭ неодинаково активно вовлекаются в гипергенную миграцию. В результате соотношения концентраций между ними в материнских породах и корах выветривания могут сильно различаться. Дополнительные трудности создают экранирующие свойства растительного покрова и высокая обводненность отдельных элементарных ландшафтов.

Для оконтуривания радиоактивных аномалий часто используют регрессионный анализ. Разностная характеристика зависимого радиометрического параметра рассчитывается относительно линейного или нелинейного тренда его взаимосвязи с другими радиогеохимическими характеристиками. В результате удается снизить влияние фоновой флуктуации содержаний радиоактивных элементов, связанной с

минеральным составом горных пород, а также формирующихся по ним кор выветривания и почв [14, 17, 20, 22]. Для интеграции многокомпонентной информации, в т. ч. концентраций ЕРЭ и производных отношений, используют факторный анализ методом главных компонентов (РСА) [13, 17, 21]. В отличие от регрессионных уравнений в РСА отсутствуют зависимые переменные, а информация разделена на набор компонентов, не коррелирующих между собой. Однако, иногда не происходит их удовлетворительного разделения начальные дисперсии от радиоактивности типов горных пород, ландшафтов и наложенных изменений. Компоненты высокого порядка статистически менее надежны и их обособление, главным образом, используется для уменьшения влияния высокочастотного шума [11, 17]. Перечисленные проблемы в меньшей степени относятся к классификационным моделям и, в частности, к полученным кластер-анализом, который рекомендуется использовать в обработке гамма-спектрометрических измерений при геологическом картировании [17]. Чаще привлекается итерационная неконтролируемая кластеризация методом k -средних. Формирование групп происходит путем причисления наблюдений к тому кластеру, к центру (центроиду) которого оно ближе всего. Метод хорошо подходит для классификации больших объемов информации, а одноуровневое представление результатов простое для интерпретации.

Ситуация усложняется, когда гамма-спектрометрическая съемка проводится на территории с большим представительством измененных пород в общей структуре геологического строения. В основном это касается наземной гамма-спектрометрии, решающей задачи картирования околорудных гидротермалитов в условиях пространственной близости к известным рудным месторождениям и проявлениям. В этих случаях радиоактивные характеристики метасоматитов начинают вносить существенный вклад в статистические модели, получаемые регрессионным и в меньшей степени многофакторным анализом. Как следствие, искажаются числовые критерии разделения фона и аномалий искомых объектов. Возможным решением данной проблемы является создание пространственных классификационных моделей распределения ЕРЭ и их использование для «выравнивания» уровня фона [6]. В материалах приводится пример реализации такого подхода при поисках зон гидротермальной $Ag-Pb-Zn$ минерализации. В обработку данных внесены изменения, улучшившие достоверность получаемых результатов.

Методика и условия проведения

Наземная гамма-спектрометрическая съемка проводилась по сети 10×20 м. Концентрации ^{40}K , eU (по ^{226}Ra), ^{232}Th определялись полевым гамма-спек-

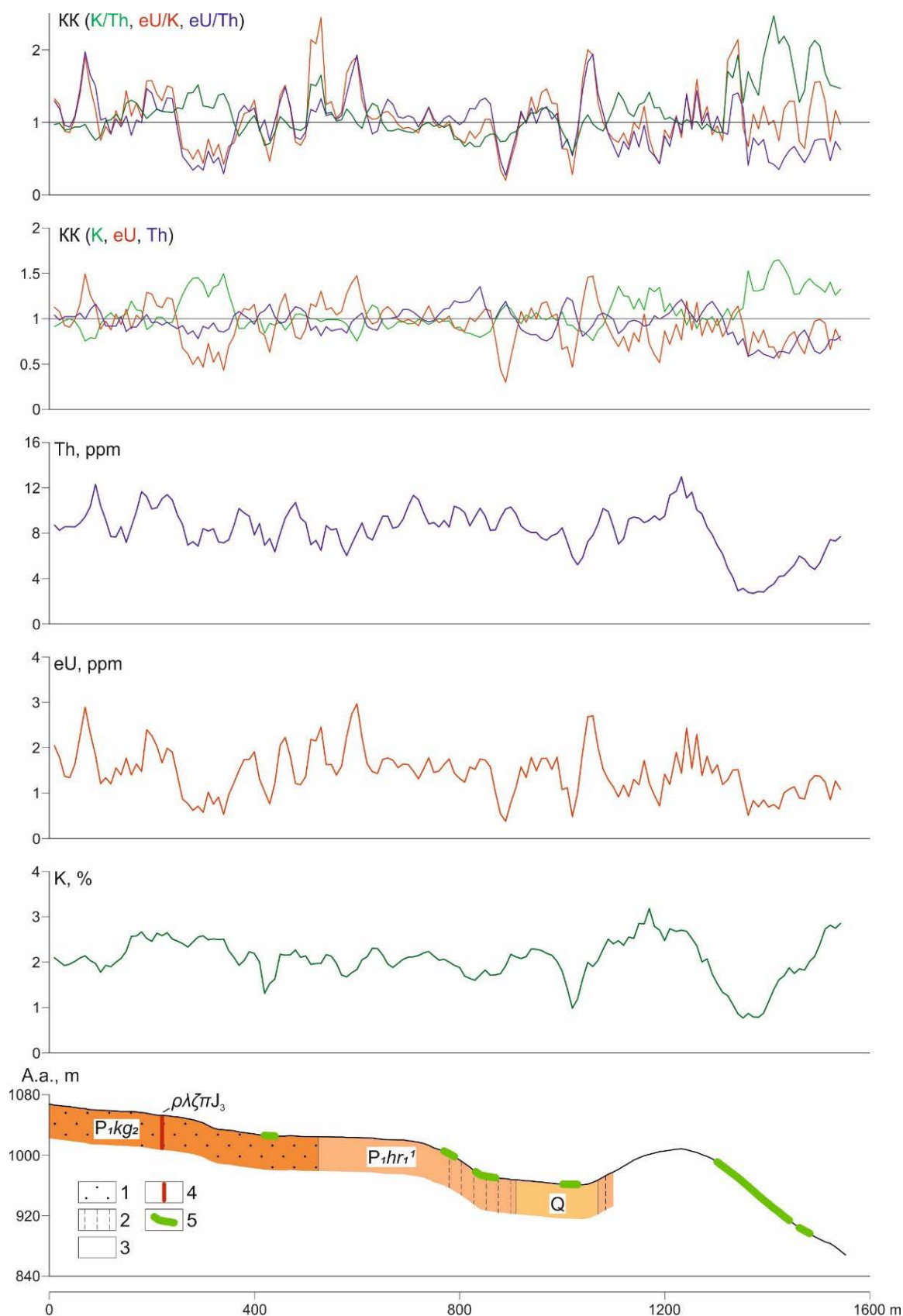


Рис. 1. Приповерхностное геологическое строение, графики содержаний и коэффициентов концентраций (КК) ЕРЭ и производных отношений по линии профиля

1 – средне-крупнозернистые песчаники с редкими прослоями алевролитов; 2 – переслаивание алевролитов, мелко-среднезернистых песчаников и алевропесчаников; 3 – мелко-среднезернистые алевролиты и алевритистые песчаники; 4 – дайка плагиориодацитов порфиров; 5 – растительные экраны (по описанию операторов)

трометром МКСР-01 (производитель НТЦ «РАДЭК», г. Санкт-Петербург). Всего – 12126 точек физических наблюдений.

В пределах участка развиты верхнепалеозойские терригенные породы, прорванные разновозрастными дайками среднего и кислого состава [3]. Гидротермальные процессы и Ag–Pb–Zn рудообразование парагенетически связаны с раннемеловыми магматическими процессами. Ранний этап – образование золотосульфидной и золотомедно-порфировой минерализации. На позднем этапе происходило формирование серебро- и серебро-полиметаллического промышленного оруденения. Поздний этап имеет разрыв во времени с ранним, но временная величина его не ясная. Околожильные гидротермальные изменения выражены, главным образом, фельдшпатизацией, хлоритизацией и серицитизацией вмещающих пород. Наиболее ярко проявлены гидротермальные изменения калиевой специализации. Кварц-гидрослюдистые продукты низкотемпературных гидротермальных изменений ассоциируют с поздними рудами, обогащенными сурьмой и с низким содержанием серебра. Жилы поздних безрудных образований формируют сливной и друзовидный молочно-белый кварц в парагенезисе с кальцитом и баритом.

В геоморфологическом отношении территория представляет собой среднегорное плато с плоскими водоразделами и крутыми склонами (рис. 1). Относительные превышения 400–500 м. Район принадлежит зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Преобладают ландшафты горной тундры с определяющим значением морозного выветривания и механической (гравитационной) миграции химических элементов в зоне гипергенеза. Для большей части участка гамма-спектрометриче-

ской съемки характерны условия, благоприятные для формирования вторичных геохимических ореолов открытого типа.

Обработка и интерпретация данных

Статистическая модель пространственной изменчивости радиоактивного фона создавалась с помощью кластерного анализа методом k-средних. Кластеризация осуществлена по стандартизированным значениям концентраций K и Th, высотных отметок и углов уклона дневной поверхности на точках измерения. В статистические расчеты не принимался U по следующим обстоятельствам. Среднее содержание U на площади исследования ниже 2 ppm. Эти значения находятся около предела разрешающей способности гамма-спектрометра и вклад погрешности определения в результаты измерений приобретает ощутимое влияние. Радиевый канал при кратковременном росте влажности почвы испытывает сильное приращение сигнала за счет энергий короткоживущих гамма-активных продуктов распада радона. Количество кластеров в квалификационной модели определялось аналогично примеру J. D. Weihermannetal [24] с использованием модели гауссовой смеси и байесовским информационным критерием. В итоге разделение осуществлено на шесть кластеров. По радиоактивной характеристике первый кластер – это кислые дайки, а также кварц-гидрослюдистые гидротермалиты. Отделение второго и третьего кластеров во многом происходит по геоморфологическим параметрам. В пространстве эти кластеры охватывают крутые склоны и их более выложенные нижние части без толстой моховой подушки. Вероятно, относительное обогащение радионуклидами присклоновых участков (второй кластер) связано с привносом глинистых частиц результатами водного смыва с крутых склонов. По литологиче-

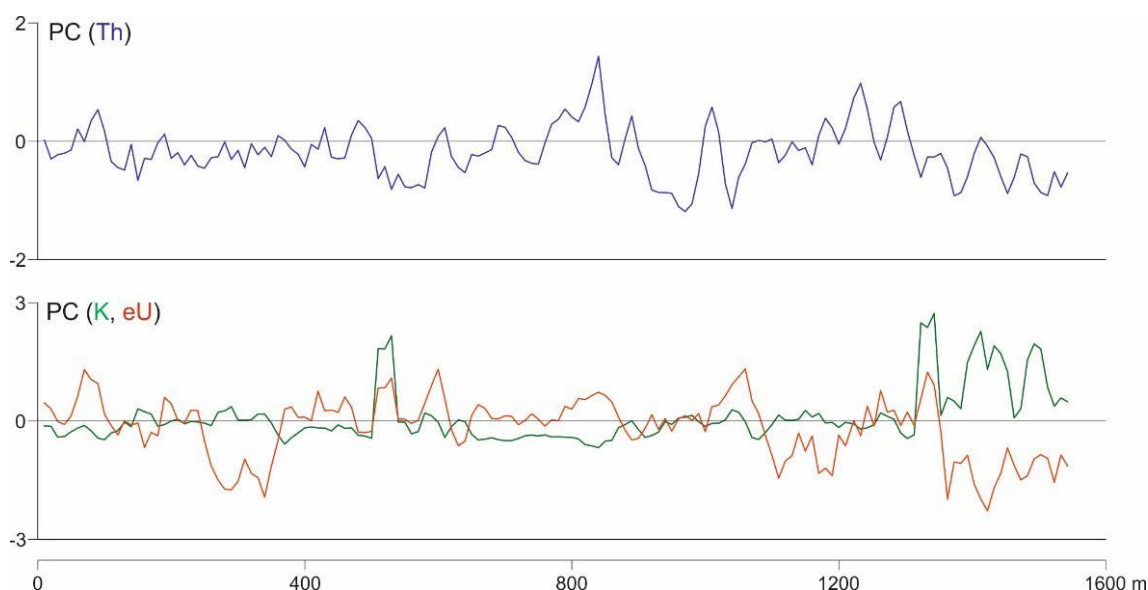


Рис. 2. Графики факторных значений главных компонент (PC) по линии профиля

скому составу это преимущественно алевролиты и алевропесчаники. Четвертый, наиболее представительный кластер, объединяет точки измерений в пределах разнозернистых песчаников водораздельного плато. Пятый и шестой кластер разделяет радиоактивность участков развития растительных экранов плоских поверхностей рельефа и крутых склонов ССВ экспозиции. Болота (шестой кластер) являются большим, чем склоновый мох препятствием для гамма-излучения горных пород.

Снижение доли дисперсии распределения ЕРЭ, связанной с изменчивостью литотипов пород и местных ландшафтов, осуществлялось переходом к анализу коэффициентов концентраций (КК) (рис. 1). Их расчет – это нормирование концентраций радионуклидов на соответствующие средние медианные в выборках кластеров. Использование медианы позволило «отсечь» влияние аргиллизитов на оценку среднего содержания ЕРЭ для точек первого кластера. После процедуры «выравнивая» коэффициенты вариации снизились на 6 %, 15 %, 7 % для К, еU и Th, соответственно. Интеграция стандартизиро-

ванных данных КК–К, еU, Th, К/Th, еU/К, еU/Th осуществлялась PCA с вращением Varimax. При использовании коэффициентов концентраций произошли улучшения в структуре факторных нагрузок главных компонентов (PC) с позиции радиогеохимических моделей гидротермалитов. Первый главный компонент (PC (еU)) ореолами положительных факторных значений картирует области развития аргиллизитов (рис. 2). Они характеризуются ростом концентраций еU, при выносе К и увеличении значений еU/К, еU/Th. Второй главный компонент (PC (К)) через антагонизм К и Th, а также положительной корреляцией К с К/Th, еU/Th описывает продукты калиевого метасоматоза. Контрастные ореолы высокого факторного влияния PC (К) в пространстве хорошо дополняются низкими значениями PC (еU), что усиливает достоверность оконтуривания кварц-серицитовых гидротермалитов. Факторные значения PC (Th) – это смесь высокочастотных артефактов дисперсии Th в областях гидротермальных изменений и участках развития растительных экранов.

Литература

1. Богоявленский Л. Н. Радиометрическая разведка нефти // Известия Института прикладной геофизики ВСНХ СССР, 1927. – Вып. 3. – С. 113–123.
2. Гавшин В. М. Радиогеохимическая специфика осадочных бассейнов Западной и Средней Сибири // Геология и радиогеохимия Средней Сибири. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 173–192.
3. Некрасов А. И. Золото-медно-порфировое с сербром оруденение Эндыбальского субвулкана, Западное Верхоянье // Руды и Металлы, 2009. – № 2. – С. 46–67.
4. Портнов А. М. Радиометрический поиск руды // Природа, 1984. – № 5. – С. 99–105.
5. Рихванов Л. П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований (на примере Алтае-Саянской складчатой области). – Новосибирск: Изд-во СО РАН «Гео», 2002. – 536 с.
6. Соболев И. С., Орехов А. Н., Соболева Н. П. Использование элементов многомерной статистики для обработки данных наземной гамма-спектрометрии при поисках гидротермальных месторождений золота // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – № 7 (329). – С. 104–115.
7. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
8. Adams J. A. S., Weaver C. E. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes – an example of geochemical facies // AAPG Bulletin, 1958. – № 42. – P. 387–430.
9. Adams J. A. S., Osmond J. K., Rogers J. J. W. The geochemistry of thorium and uranium / L. H. Ahrens et al. (Eds.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 3. – New York: Pergamon Press, 1959. – P. 398–448.
10. Davis J. D., Guilbert J. M. Distribution of the radioelements potassium, uranium and thorium selected porphyry copper deposits // Economic Geology, 1973. – № 2 (68). – P. 145–160.
11. de Lima R. P., Marfurt K. J. Principal component analysis and k-means analysis of airborne gamma-ray spectrometry surveys // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018. Society of Exploration Geophysicists, 2018. – P. 2277–2281.
12. Dickson B. L., Scott K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors // AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 1997. – № 2 (17). – P. 187–200.
13. Duval J. S., 1976. Statistical interpretation of airborne gamma-ray spectrometric data using factor analysis // Exploration for uranium ore deposits. – Vienna: IAEA, 1976. – P. 71–79.
14. Galbraith J. H., Saunders D. F. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements // Journal of Geochemistry Exploration, 1983. – № 18. – P. 49–3.
15. Gangadharam E. V., Kameswara Rao K., Aswathanarayana U. Distribution of radioactivity in the Mosaboni Cooper Mine, Bihar, India // Economic Geology, 1963. – № 4 (58). – P. 506–514.
16. Gross W. H. Radioactivity as a guide to ore // Economic Geology, 1952. – № 7 (47). – P. 722–742.

17. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. – Vienna: IAEA-TECDOC, 2003. – 173 p.
18. Moxham R. M., Foote R. S., Bunker C. M. Gamma – ray spectrometer studies of hydrothermal altered rocks // *Economic Geology*, 1965. – № 4 (60). – P. 653–671.
19. Ostrovskiy E. Ya. Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting // *International Geology Review*, 1975. – № 4 (17). – P. 461–468.
20. Pires A. C. B., Carmelo A. C., Martins-Ferreira M. A. C. M., 2019. Statistical enhancement of airborne gamma-ray uranium anomalies: minimizing the lithological background contribution in mineral exploration // *Journal of Geochemical Exploration*, 2019. – V. 198. – P. 100–113.
21. Ranjbar H., Hassanzadeh H., Torabi M., Ilaghi O. Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehas area, Kerman Province, Iran, using principal component analysis // *Journal of Applied Geophysics*, 2001. – № 4. – P. 33–1.
22. Saunders D. F., Burson K. R., Branch J. F. Integrated surface methods profiles, two East Texas fields // *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*, 1993. – V. 9. – P. 32–50.
23. Sikka D. B. Aero-gamma ray spectrometer aids in the detection of faults // *Research Bulletin of the Panjab University*, 1962. – V. 13, Parts I–II. – P. 91–102.
24. Weihermann J. D., Ferreira M. P., de Casto L. G., Ferreira F. J. F., Silva F. M. Retrieving geological units with unsupervised clustering of gamma-ray spectrometry data // *Journal of Applied Geophysics*, 2021. – № 184. – P. 1–9.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ И РАДИОЦЕЗИЙ В ВЗВЕСИ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

В. Д. Страховенко

*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
Новосибирск, strahova@igm.nsc.ru*

NATURAL RADIONUCLIDES AND RADIOCESIUM IN THE SUSPENSION AND BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE ONEGO

V. D. Strakhovenko

*V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS
Novosibirsk, strahova@igm.nsc.ru*

The natural variations of U, Th, K contents and Th/U, K/Th ratios and radiocesium in conjugate components of the system of Lake Onego (suspended matter and stratified sediment cores from different parts of lake) have been determined. These values change in different components within a wide range, with average Th/U ratios of 2.8–5.2. Comparison of the average content of elements in the stratified core of the bottom sediments and suspended matter (from the filters and sedimentation traps) from different parts of Lake Onego and the distribution of natural radionuclides do not reveal any significant differences and completely coincide with the contents in shield's crystalline rocks, siltstones and sandstones of Russian Platform Scale Composite. The overall ^{137}Cs pollution of bottom sediments of Lake Onego is more than twice higher to the global background.

Изучение поведения урана и тория и величины Th/U отношения в экзогенных процессах позволяет решать многие геохимические проблемы и оценивать радиационное состояние окружающей среды [10, 12]. Величина отношения Th к U, начиная от Солнечной системы в целом (Th/U = 3,72) магматических образований, находится в чрезвычайно узком интервале значений (2,5–5,5) при преобладании 3,5–4,5. Уран и торий, обычно в горных породах и минералах встречаются совместно, но значительно различаются по своим свойствам в условиях окружающей среды в силу того, что в экзогенных условиях U^{4+} переходит в U^{6+} [9]. Согласно многочисленным публикациям

[2, 9–13 и др.] поведение тория определяется, главным образом, количеством и активностью областей сноса, распределение ^{40}K обусловлено соотношением в донных отложениях калия, заключенного в гидрослюдах минералах и полевых шпатах. Уран, который наиболее подвижен и устойчив в водах в окислительных условиях поверхностных процессов относительно других радионуклидов, часто в восстановленных условиях образует горизонты с резким увеличением его концентраций [2, 4]. Согласно работам ряда авторов, химическое осаждение урана в процессе седиментогенеза связывают с его восстановлением ниже границы зоны кислородного насы-